

# 基于集对分析的地质灾害防治优态共存准则

龚士良

(中国地质调查局 地面沉降研究中心, 上海 200072)

**摘要:** 地质灾害的孕育与发展过程具有诸多不确定性, 借助处理系统不确定性问题的“集对分析”理论, 剖析了地质灾害防治中相关因素及其作用与转化, 提出了经济社会发展、资源开发利用与生态环境保护相互协同的优态共存准则, 有助于促进地质灾害防治。

**关键词:** 地质灾害; 集对分析; 优态共存; 环境安全

**中图分类号:** P694

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671 - 1211(2010)02 - 0153 - 05

## 0 引言

中国的地质灾害易发高发, 造成大量人员伤亡, 经济损失巨大, 是世界上灾情最严重的国家之一。地质灾害影响生态文明建设与和谐社会创建进程, 制约经济社会可持续发展。地质灾害防治关乎国计民生, 也是落实科学发展观的重大国家战略。

地质灾害的孕育与发展受多重因素的制约, 其中包括众多不确定性。本文运用处理不确定性问题的“集对分析”原理与方法<sup>[1]</sup>, 剖析地质灾害制约因素的作用与影响, 探讨灾害防治中诸多关系的优态共存准则, 为地质灾害研究与防治提供借鉴。

## 1 地质灾害及其特点

### 1.1 地质灾害内涵与属性

地质灾害是在地质营力或人为活动作用下, 造成人类赖以生存与发展的资源及环境发生恶化和严重破坏, 并危害人民生命和财产安全的现象或过程。

地质灾害具有致灾的动力条件和灾害后果两大特征, 因此它既有自然属性, 也有社会经济属性。

自然属性是围绕地质灾害的动力过程表现出来的各种自然特征, 如地质灾害的规模、强度、频次以及灾害活动的孕育条件、变化规律等; 社会经济属性是与成灾活动密切相关的人类社会经济特征, 如经济发展水平、人口分布情况、资源开发强度、工程建设活动、地区防灾能力等。

地质灾害是自然动力活动与人类社会经济活动相互作用的结果, 是两者对立统一的综合体现。

### 1.2 地质灾害类别与特性

地质灾害有 30 余种, 其中崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝、地面沉降是主要的灾害类型, 具有典型性和代表性<sup>[2]</sup>。

根据灾害成因, 可分为内动力地质灾害 (如地震引发)、外动力地质灾害 (如强降雨、冰冻等异常气候激发)、人为动力地质灾害 (如矿山开发、地下采掘等诱发); 根据灾害分布的区域自然地理条件, 可分为山地地质灾害 (如崩塌、滑坡、泥石流等)、平原地质灾害 (如地面沉降等)。

根据成灾特点, 地质灾害分为突发型和缓变型两类。突发型地质灾害的基本特征是灾害的孕育过程相对较长, 但成熟后的发生过程通常非常短暂, 具有爆发性性质。而缓变型地质灾害的突出特点是发生时间相对漫长, 其孕育发展与灾害过程基本一致, 具有缓慢累积性质。

突发型地质灾害包括崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷等, 缓变型地质灾害包括地面沉降、地裂缝、海水入侵等。

地质灾害通常具有相互伴生性, 并与其它灾害形成灾害链, 由此导致灾情加剧, 其作用机制也呈现系统性和复杂化。

## 2 地质灾害集对论剖析

### 2.1 集对分析基本原理与方法

中国学者赵克勤先生创立的“集对分析”是系统工程中处理不确定性问题的重要理论。该理论认为不确定性客观而普遍地存在于各种事物与系统之中, 是

收稿日期: 2009 - 04 - 02; 改回日期: 2009 - 10 - 26

基金项目: 国土资源部首批百名优秀青年科技人才计划 (200218)。

作者简介: 龚士良 (1965 -), 男, 教授级高级工程师, 博士, 水文地质专业, 从事资源与环境研究。E-mail: gong\_shiliang@126.com

运动与发展的内在属性与具体表现,并将矛盾统一体中的基本单位称为“集对”,组成集对的两个集合间的联系具有同一、差异、对立关系(简称同异反)和既确定又不确定的特征。通过研究其联系、可变与转化,认识和把握由此组成的系统的运动发展规律,进而分析处理各类纷繁复杂的现实问题<sup>[3]</sup>。

集对分析理论的核心思想是将系统内确定与不确定性予以辩证分析和数学处理,体现系统、辩证、数学三个特点,引入联系度及其数学表达,统一描述各种不确定性,从而实现对不确定性的分析处理<sup>[4]</sup>。

联系度及其数学表达建立的基本准则如下。

设根据问题  $W$ ,对由集  $A$  和集  $B$  所组成的集对  $H$  展开分析,共得到  $N$  个特性,其中有  $S$  个为集对中两个集合所共有,这两个集合又在  $P$  个特性上相对立,在其余的  $F$  个特性上关系不确定,则在不计各特性权重的情况下,称:

$S/N$  为集合  $A$  与集合  $B$  在问题  $W$  下的同一度,简记为  $a$ ;

$F/N$  为集合  $A$  与集合  $B$  在问题  $W$  下的差异度,简记为  $b$ ;

$P/N$  为集合  $A$  与集合  $B$  在问题  $W$  下的对立度,简记为  $c$ 。

由于同一度、差异度、对立度是从不同侧面刻画两个集合的联系状况,因此为全面描述系统总的联系态势,采用如下表达式:

$$\mu(W) = S/N + (F/N)i + (P/N)j = a + bi + cj$$

式中的  $i$  为差异不确定度的系数,视不同情况在  $[-1, 1]$  区间取值,有时  $i$  仅起标记作用;  $j$  为对立度系数,取值  $-1$ ,有时  $j$  也仅起标记作用;  $\mu$  为联系度,在一般情况下表示等式右边的式子,特殊情况下则是一个数值,此时称为联系数。

$a, b, c$  可据实际情况予以不同的界定,并可通过多重方式对复杂系统予以综合描述。如对诸多影响因子进行多元权重分析,对系统的结构层次性进行递阶分解,对作用因子的组合效应采用矩阵分析,对作用过程采用时间函数等,从而全面地进行系统状态及其性质变化的比较分析与深入研究。

根据集对分析原理,在同一度  $a$ 、差异度  $b$ 、对立度  $c$  归一化条件下,当  $a > c$  时,系统呈趋同态势;当  $a = c$  时,系统呈均势;当  $a < c$  时,则呈趋反态势。而差异度  $b$  的不确定度同时具有或向同一或向对立转化的趋势,依照同异反的逻辑大小关系,系统的同势和反势可分为 5 级,均势可分为 3 级,如表 1 所示。

表 1 同异反关系及其系统态势

Table 1 Relations of the identical discrepancy and systems situation

序号	同异反逻辑关系	态势	态势级别
1	$a > c, a > b, b > c$	强同势	同势 1 级
2	$a > c, a > b, b = c$	次同势	同势 2 级
3	$a > c, a > b, b < c$	准同势	同势 3 级
4	$a > c, a = b, b > c$	弱同势	同势 4 级
5	$a > c, a < b, b > c$	微同势	同势 5 级
6	$a = c, a > b, b < c$	强均势	均势 1 级
7	$a = c, a = b, b = c$	准均势	均势 2 级
8	$a = c, a < b, b > c$	弱均势	均势 3 级
9	$a < c, a > b, b < c$	微反势	反势 5 级
10	$a < c, a = b, b < c$	弱反势	反势 4 级
11	$a < c, a < b, b > c$	准反势	反势 3 级
12	$a < c, a < b, b = c$	次反势	反势 2 级
13	$a < c, a < b, b < c$	强反势	反势 1 级

## 2.2 孕灾机制与致灾过程集对分析

地质灾害制约因素众多,对经济与社会的影响广泛深远,在现有的认识水平和技术条件下,其内在机制与作用过程存在诸多不确定性。因此,集对分析理论与方法,是地质灾害研究中新的的重要途径和手段。

地质灾害是地球自身运动导致的能量与物质转移的外在表现形式之一,因此它与地质构造格局有密切联系。中国的地质构造格局具有经向分带的显著特点,对区域性地质灾害的分布起着重要的控制作用。在构造运动形成的三个地形阶梯中,位于中部第二阶梯崇山峻岭地区的崩塌、滑坡、泥石流等山地地质灾害占中国地质灾害的 90% 以上,而东部第四纪地层广布且深厚的第三阶梯平原区则以地面沉降、地裂缝、胀缩土、海水入侵等缓变型的地质灾害为主<sup>[5]</sup>。中国气候也具明显的纬向分带性,受地貌形态的影响,来自西北的干寒气流与来自东南的暖湿气流在中部的丘陵山区容易交汇并形成局地强降水,复杂多变的气象要素和频繁的危害性天气过程也进一步加剧了山地地质灾害的发生与发展。

除上述的自然因素以外,经济工程活动等人为因素也影响着地质灾害形成和发展。随着工业化、城市化的兴起和不断发展,人类经济工程活动日益加剧,已成为重要的地质营力。人为活动诱发或加剧的地质灾害,反过来又对人与社会的安全和经济发展构成严重威胁<sup>[6]</sup>。

地质灾害的孕育与发展是能量积聚与释放的过程,是灾变要素的量变转化为质变的过程,是由潜伏性

向灾变性转化的过程。

地质灾害的形成必须具备致灾体与承灾体两方面的条件,这两方面不仅决定灾害是否发生,也决定成灾规模的大小,而其变化发展与相互作用通常又是难以精准确定的。致灾体与承灾体是地质灾害分析中的典型“集对”,而其中包含的诸多不确定性又为“集对分析”的应用提供了充分而广阔的空间。

根据集对分析理论与方法,地质灾害集对分析联系度关系式为:

$$\mu = a + bi + cj$$

其中: $\mu$ ——联系度; $a$ ——承灾体状态标量; $b$ ——地质灾害状态标量; $c$ ——致灾体状态标量; $i$ ——不确定性标度; $j$ ——对立性标度。

承灾体状态标量  $a$  表征地质环境容量与灾害承载力等指标,  $a$  值越大, 地质灾害的防御与承受能力越强, 稳定性较高。

地质灾害状态标量  $b$  表征孕灾过程的发展态势,  $b$  值越大, 灾害特性越趋明显,  $b$  值越小则趋向稳定。  $b$  值可认为是地质灾害的过程状态量, 其增长即是灾害的孕育与发展过程的刻画, 其最大值即灾害的临界状态, 在其附近则可视为灾害预警区间。因此,  $b$  值也可作为地质灾害预警预报的阈值指标。

致灾体状态标量  $c$  表征灾变要素的活动强度,  $c$  值越大, 越促使地质灾害的形成与发展, 破坏性和灾害后果也越强。

根据地质灾害的调查分析, 参照集对分析的同异反态势及其状态跃迁, 可以看出: 突发型地质灾害稳定性较差、破坏性更强, 而缓变型地质灾害稳定性相对较高、破坏性不甚直观。因此, 前者  $a$  值小、 $c$  值大, 而后者  $a$  值大、 $c$  值小。突发型地质灾害属高潜势灾害, 而缓变型地质灾害为低或中潜势灾害<sup>[7]</sup>。

### 3 地质灾害防治优态共存准则

#### 3.1 基本准则

地质灾害防治是一项涉及面广的系统工程, 而地质灾害究其实质是地质环境生存状态的一种表现形式, 是环境安全危态的具体体现。

地质环境具有可供人类开发利用的资源属性, 又具有危害人类正常生产与生活甚至生命安全的灾害属性, 两者往往又是相辅相成的<sup>[8]</sup>。对地质环境开发利用不当将会导致环境负效应, 其影响具有扩散性与延滞性, 而不局限于局部地区或某一短暂时期。在高强度社会生产力的作用下, 地质环境的灾害属性因大规模开发利用而日益凸显。地质环境开发利用的趋利避

害, 以及可持续发展要求下难以再生性地质资源的永续利用, 这都是对作为自然资源和地质灾害载体的地质环境认识的根本, 也是制定与实施地质灾害防治规划和战略的着眼点。

地质环境的资源属性具有支持作用, 有了资源人类才可能有条件开展经济活动; 而地质环境的灾害属性则起了限制作用, 资源有限、环境容量有限, 经济发展与开发强度要受到资源量和环境容量的限制与制约。

因此, 地质灾害是经济发展、资源开发与环境保护三者的交集, 地质灾害防治因此也是在认识、调整和协调三者的关系。

以地质灾害防治为核心的地质环境合理开发利用, 应把人与地质环境作为一个整体系统来寻求两者的共生共存关系, 必须正确认识和应对工程经济活动给地质环境与生态环境带来的正负效应, 并据此建立和谐的生态地球观。

对地质环境和资源属性这个集对而言, 一定的地质环境常常蕴藏着相应的资源, 这说明地质环境与资源有着同一性, 这里所说的同一性还包括人们在一定范围内开发利用其中的资源而不产生危害环境的后果这一层意思。但过度或不合理开发利用将会产生地质灾害, 这又表明地质环境与资源存在对立的一面, 不论是同一性还是对立性, 都是运动着的, 是变化的, 在统一性和对立性之间存在着中介过渡和各自向相反方向转化的可能与趋势, 这一过程是复杂和不确定的。

地质环境系统内各结构组分相互影响与制约, 其间有诸多不确定因素, 对系统内部变化及其反馈的了解是解决问题的关键。系统中正向反馈过程属于恶性循环而难以控制, 而逆向反馈过程可通过自动调节达到某种平衡状态并较容易控制。地质资源是有限且非再生性的, 对土地、地下水、矿产等自然资源的利用必须在经济考虑和环境准则之间取得平衡, 同时必须对其长期累积性后果承担责任。

而由同一与对立相互转化的基本原理可知, 获取的资源量越多, 灾害危险性越大。资源消耗一定程度上是灾害聚能的过程, 其间的转化不确定度已开始渐趋明朗。地质灾害的防治必须对灾害前兆进行识别, 对顶点事件(灾变)进行预测, 由同异反分析可资风险评估<sup>[9]</sup>。

地质环境状态可分为优化、弱化、劣化、恶化四种状态, 与之对应的灾害形态则分别为: 没有威胁、有潜在威胁、有间接威胁、有直接威胁。直接威胁是典型的危险状态, 而生存优态则是真正的安全状态<sup>[10]</sup>。由

此,地质灾害防治应追求行为体间的优态共存,实现更高层次上的环境安全。

优态共存是地质灾害防治中环境安全新的思考视角。首先,优态是安全指向的对象,表征的是行为体可持续发展的生存境况,标示出安全所要达到的更深远的价值目标是发展与安全;其次,共存是安全获得的条件,唯有相互协同才能和谐共处,使地质环境系统处于安全态势,降低环境危机的威胁<sup>[11]</sup>。

由此,若将地质环境所具有的资源属性作为同一度,将地质环境同时具有的危害属性作为对立度,将人类对地质环境的开发利用强度作为差异度,则要确保地质环境处于安全状态而不引发地质灾害,必须使对资源的开发利用处于有效控制状态,既要小于可采资源量,也要小于致灾的开发强度。从而使地质环境系统呈现健康稳定的同势状态,而避免或减弱容易诱发地质灾害的反势状态。

地质灾害防治是守业经济,减灾就是增效。其突出特点就是“以负换正、减负得正、负负得正”,通过防灾投入“负”效益的影响作用,来减少灾害损失,而减少的部分就是正效益。用集对分析同异反的辩证观点,就是减小对立度,也即相应地增大了同一度,从而使系统态势的同一性即稳定度得到了提高。而防灾措施的实施,也使不确定度得以有效降低,并促进同一度增加和对立度减小,综合效益得到显现。

地质灾害具有不可逆性,而灾害的孕育过程通常较为隐蔽而易被忽视并使人麻痹,而一旦致灾则难以逆转,危害充分凸显,治理难度骤增。因此,未雨绸缪、防患未然是地质灾害防治的首要 and 关键。防灾减灾工作是持续性的,防治工程应体现风险最小、效益最大的最优化原则,从而构建灾害综合防御与风险管理体系。

### 3.2 应用实例

“优态共存”准则是落实科学发展观、构建和谐社会主义与生态文明的重要思维方式与技术途径,对于中国地质灾害防治实践具有现实意义和指导价值。要实现经济社会的可持续发展,必须协调资源开发与环境保护之间相互依存、相互制约与相互影响等诸多关系,使经济社会发展、资源开发利用、生态环境保护三者共同进步,并处于和谐共处的良好状态。

工业革命以及城市化进程,伴随着经济快速发展,对自然资源的需求及其开发强度日益提高,因此环境地质问题也逐渐显露并日趋严峻,人为因素诱发或加剧的地质灾害频繁,严重制约经济社会可持续发展。

在内陆构造盆地、滨海平原、河流三角洲等城市群密布地区,大规模开采地下水资源引发地面沉降十分

普遍。根据地下水的赋存状况、补给条件以及地质环境容量、城市灾害承载能力等,确定合理的地面沉降速率与最大沉降量控制指标、地下水位降幅、地下水可采资源量,从而最大限度地满足经济发展对水资源的客观需求,这是协调经济—资源—环境三者关系,实现并促进“优态共存”的典型实例,其在实践中已发挥了重要作用<sup>[12-14]</sup>。

在城市土地资源利用中,集约化节约化成为大势所趋,地下空间开发、高层建筑兴建、滩涂后备土地资源利用等逐渐成为城市立体化发展的重要途径,而相对脆弱的地质环境系统也容易诱发各类环境地质问题乃至地质灾害。充分认识地质条件的制约影响,借助各种工程措施,化劣势为比较优势,既可有效降低灾害隐患,又能达到资源的综合利用<sup>[15]</sup>。如滨海城市软土层广泛分布,是地面沉降与引发工程事故的主要层位<sup>[16]</sup>,但其土体软弱,为地下空间的开发利用提供了施工便利,较大的摩阻力也使摩擦桩在工程中得到广泛应用。这也是地质环境条件由“劣态”、“危态”转化为“优态”并“共存”的实际体现。

## 4 结语

地质灾害严重威胁人民生命与财产安全,直接影响社会经济的可持续发展。地质灾害防治应充分重视地质环境系统的状态、性质及其灾变过程,正确认识和深入剖析诸多矛盾的对立统一及系统不确定性的作用和影响,注重和突出经济发展、资源利用与地质环境的优态共存,以此理念和准则实施地质灾害防治战略,将有效促进人与环境的和谐,人与社会的安全与发展。

### 参考文献:

- [1] 赵克勤. 集对论——一种新的不确定性理论、方法与应用 [J]. 系统工程, 1996, 14(1): 18 - 23, 72
- [2] 段永侯, 罗元华, 柳源. 中国地质灾害 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [3] 赵克勤. 集对分析及其初步应用 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000: 114 - 190.
- [4] 赵克勤. 集对分析对不确定性的描述与处理 [J]. 信息与控制, 1995, 24(3): 162 - 166.
- [5] 龚士良. 长江中下游环境地质问题及对防洪工程的影响 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(3): 19 - 27.
- [6] 龚士良. 上海地面沉降与城市防汛安全 [J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(4): 96 - 101.
- [7] 龚士良. 集对分析及在城市地面沉降研究中的应用 [J]. 水文地质工程地质, 1998, 25(5): 33 - 35, 40.
- [8] 龚士良. 地质环境合理开发利用集对论准则 [J]. 地质灾害与环境保护, 2003, 14(2): 34 - 38.

- [9] 龚士良. 中国地质灾害风险评估集对态势分析方法 [J]. 安阳工学院学报, 2009, 8(2): 83 - 87.
- [10] 余潇枫, 潘一禾, 王江丽. 非传统安全概论 [M]. 杭州: 浙江人民出版社, 2006: 351 - 354.
- [11] 余潇枫. 非传统安全与公共危机治理 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007: 154 - 160.
- [12] 王文圣, 金菊良, 丁晶, 等. 水资源系统评价新方法—集对评价法 [J]. 中国科学 (E 辑), 2009, 39(9): 1 529 - 1 534.
- [13] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型 [J]. 水利学报, 2008, 39(4): 401 - 409.
- [14] 龚士良. 上海地下水流场变化及对地面沉降发展的影响 [J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(3): 1 - 6.
- [15] 龚士良. 长江口水域砂矿资源及其合理开发利用 [J]. 资源环境与工程, 2009, 23(3): 335 - 338.
- [16] Gong Shiliang. The microscopic characteristics of Shanghai soft clay and its effect on soil body deformation and land subsidence [J]. Environmental Geology, 2009, 56(6): 1 051 - 1 056.

(责任编辑: 潘 潇)

## Superior Coexistence Criterion of Geological Disaster Control Based on Set Pair Theory

GONG Shiliang

(Center for Land Subsidence of China Geological Survey, Shanghai 200072)

**Abstract:** The gestation and progress process of geological disaster have many uncertainties. Using theory of Set Pair Analysis (SPA) as study uncertainties problem in systems engineering, all correlation factors and its effect and transform are analyzed. Superior coexistence criterion of cooperate with economy-society development and natural resource exploitation and geo-environment protection is advanced. It shall contribute to geological disaster prevention.

**Key words:** geological disaster; set pair analysis; superior coexistence; environmental security

(上接 129页)

## Geological Characteristics and Prospecting Potential of Ultra-low-grade Magnetite of Yaolinghe Formation in Northwestern Hubei

YANG Jianzhong, XIAO Yingzu, SHI Zhangji, SUN Hanyong

(Geological Survey of Northwest Hubei, Xiangfan, Hubei 441057)

**Abstract:** The authors summarize metallogenic geological conditions and distribution law of Yaolinghe Formation of Nanhuan system and also discuss prospecting potential of ultra-low-grade magnetite of Yaolinghe Formation. Iron-bearing rock series of the upper body in Yaolinghe group and occurrence of low-grade magnetite ore body are controlled by the volcanic eruption sediment, while ore enrichment also affected by the volcanic eruption center control. Volcanic eruption sedimentary rocks of the upper body in Yaolinghe group have periodicity and rhythmicity. The early stage is cycle of mainly extrusive sedimentary iron, the last stage is cycle with explosive sedimentary iron. Iron metallogenic specialization with an inverse proportion between iron content and the  $SiO_2$  in general. It belongs to volcanic eruption sedimentary iron ore, similar to Dahongshan style iron mine in China. Metamorphic rocks in Yaolinghe group widely distributed in northwestern Hubei which provide great prospecting for finding ultra-low grade magnetite. Based on the widely and systematically collected information in recent years and predecessor's research,

**Key words:** Yaolinghe Formation; ultra-low-grade magnetite; geological characteristics; prospecting Potential; Northwestern Hubei